استفاده از تحلیل‌های عددی و حساسیت برای بررسی رفتار تیرهای خمشی بتن مسلح تقویت شده با ورق‌های FRP *

محمد رضا اصفهانی [۱]		طیبه محمدی [۲]

چکیده *در این مقاله، با بهره گرفتن از روش های عددی و نتیجه‌های آزمایشگاهی، رفتار تیرهای خمشی بتن مسلح تقویت شده با ورق‌های FRP مورد بررسی قرار می گیرد. در تحلیل عددی، از الگو آسیب دیدگی مومسان بتن برای شبیه سازی رفتار غیر خطی بتن و نرم شوندگی کرنش آن استفاده می شود. در بخش آزمایشگاهی ۸ عدد تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق های FRP به ابعاد مقطع ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی متر و طول ۲۳۰۰ میلی متر در آزمایشگاه ساخته و آزمایش شدند. رفتار خمشی این تیرها و ٤ نمونه تیر آزمایشی دیگر پژوهشگران (در مجموع ۱۲ نمونه) به کمک نرم افزار توانمند اجزای محدود ABAQUS که از توانایی کاربرد الگوی آسیب دیدگی مومسان بتن برخوردار است، تحلیل شدند. مقایسه بین نتیجه‌های تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تحلیل عددی انجام شده با دقت بالایی می‌تواند نمودار بار- جابه جایی، بار بیشینه، توزیع کرنش و حالت شکست تیرهای بتنی تقویت شده با FRP را پیش‌بینی می‌کند. برای تعیین اثر عامل‌های مختلف بر نتیجه‌های حاصل از تحلیل عددی و همچنین برای تعیین شرایط بهینه الگو سازی عددی، تحلیل حساسیتی بر روی بعضی از نمونه‌ها انجام شده است. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده، از مهمترین عامل‌های اثرگذار الگو درتحلیل عددی، کارمایه، شکست می باشد که نقش تعیین کننده ای در پیش بینی شکست‌های ناشی از جدا شدگی FRP ایفا می کند.*

واژه‌های کلیدی بتن مسلح، تحلیل حساسیت، تقویت خمشی، الگوی آسیب دیدگی مومسان بتن، مکانیک شکست، FRP

Numerical and sensitivity analysis of RC beams strengthened with FRP

M. R. Esfahani		T. Mohamadi

Abstract *In this paper, using numerical methods and test results, the behavior of reinforced concrete beams strengthened with Fiber-Reinforced Polymers (FRP) is investigated. In the numerical analysis, the concrete damaged plasticity model is used for considering the nonlinear behavior and strain softening of concrete. The ABAQUS finite element program is utilized for the analysis of 12 flexural beams strengthened with FRP sheets. Comparison between the test results and values obtained from the analysis shows that the numerical method can accurately predict the load-deflection, failure load, strain distribution and failure mode of the strengthened beams. In order to evaluate the effect of different parameters on the numerical results, a sensitivity analysis was carried out. Based on the sensitivity analysis, it was found the concrete fracture energy is an important parameter in the prediction of the behavior of the strengthened beams.*

Key Words Plastic Damage Model, FRP Laminates, Debonding, Strengthening, Fracture Energy

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۷/۹/۹و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۸۹/۳/۲۳به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) نویسنده‌ی مسئول، کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

امروزه تقویت سازه های بتن مسلح به کمک ورق‌های پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) به عنوان یک روش جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربرد FRP برای مقاوم‌سازی نسبت به روش‌های سنتی دارای برتری‌هایی مانند افزایش مقاومت و سختی زیاد، سبکی وزن، مقاومت در برابر خوردگی، ضخامت کم و حمل و نقل و نصب آسان می‌باشد. پس از چسباندن ورق FRP به تیر بتنی، پاسخ سازه در موردهایی مانند شکل‌پذیری، مقاومت و نوع شکست با رفتار سازه تقویت نشده، متفاوت است. بنابراین، آزمایش‌های تجربی و یافتن روش‌های تحلیلی و عددی برای پیش‌بینی رفتار سازه‌های تقویت شده ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل تاکنون مطالعات زیادی بر روی سازه‌های تقویت شده انجام شده است. براساس آزمایش‌های تجربی انجام شده انواع شکست تیرهای خمشی بتنی مسلح تقویت شده با ورق‌های FRP عبارتند از: ۱- تسلیم فولادهای طولی به همراه گسیختگی ورق‌های FRP؛ ۲- خردشدن بتن در فشار پیش از گسیختگی ورق‌های FRP؛ ۳- جدا شدن انتهای ورق های FRP از سطح بتن به همراه پوشش بتن روی میل‌گردهای طولی؛ ٤- جدا شدن انتهای ورق‌های FRP از سطح بتن به همراه بخشی از پوشش بتن؛ ۵- جدا شدن ورق‌های FRP از سطح بتن به همراه بخشی از پوشش بتن به علت ترک خمشی و یا ترک خمشی- برشی [1].

تا به امروز تحلیل‌های عددی بسیاری برای بررسی رفتار تیرهای خمشی تقویت شده با FRP ارایه شده است، ولی در هر یک از این روش‌ها، تنها بعضی از جنبه‌های مهم و تاثیرگذار بر تحلیل، مانند رفتار غیر خطی مواد، چگونگی بارگذاری و گسترش ترک مورد توجه قرار گرفته‌اند. هر یک از این موردها می‌تواند در پاسخ تحلیل بسیار موثر باشد، بنابراین انجام یک تحلیل حساسیت برای یافتن عامل‌های موثر در تحلیل عددی ضروری به نظر می‌رسد.

در میان روش‌های عددی مختلف به کار برده شده تاکنون می‌توان به روش اجزای محدود غیر خطی برای شبیه سازی رفتار کلی تیرهای بتنی مسلح تقویت شده با ورق‌های FRP ارایه شده توسط Baluch and Ziraba [2] اشاره کرد. این روش می‌تواند رفتار اعضای تقویت شده دارای هر نوع تاریخچه بارگذاری پیش از تقویت را پیش‌بینی کند. در این روش رفتار پیوستگی بتن و میل‌گرد و ورق‌های FRP با اجزای بین رویه ای ٦ نقطه‌ای الگوسازی شده است. Arduini و همکارانش [3] نیز هشت تیر تقویت شده با ورق‌های FRP را با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS تحلیل کرده‌اند. این تحلیل به تیرهای با تاریخچه بارگذاری یکنواخت و بدون آسیب دیدگی پیش از تقویت محدود می‌شود. در این تحلیل بتن با روش ترک پیوسته و فرض چسبندگی کامل بین بتن و FRP الگوسازی می‌شود.

به بسیاری از تحلیل‌های دیگر نیز می‌توان اشاره کرد که در آن‌ها مانند دو تحلیل عددی نامبرده، تحقیق و مطالعه بیشتر بر روی فن الگوسازی متمرکز می‌شود. همچنین از نقطه نظر عملی ویژگی‌های مواد نیز بر روی نتیجه‌های شبیه‌سازی موثر می‌باشند. بنابراین تحلیل حساسیت نتیجه‌های عددی برای حالت‌های مختلف الگوسازی و ویژگی‌های مختلف مواد می‌تواند در پیش‌بینی رفتار تیرهای تقویت شده با FRP با اهمیت باشد.

در این مقاله برای انجام تحلیل حساسیت، به تحلیل عددی دوازده تیر خمشی بتنی مسلح تقویت شده با ورق‌های FRP با استفاده از الگوی آسیب دیدگی مومسان بتن که در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS وجود دارد، پرداخته شده و نتیجه‌های تحلیل با نتیجه‌های آزمایشگاهی توسط نویسندگان این مقاله و دیگر پژوهشگران مقایسه می‌شود. سپس با انجام یک تحلیل حساسیت عامل‌های موثر در تحلیل عددی بررسی و میزان اثر گذاری هر یک از آن‌ها تعیین می‌شود.

نتیجه‌های آزمایشگاهی

درستی نتیجه‌های تحلیل عددی با مقایسه با نتیجه‌های آزمایشگاهی دو مجموعه کار پژوهشی جدا از هم بررسی شدند. چهار نمونه آزمایش شده مجموعه اول (B1, B3, B5, B7) [4] تیرهایی به عرض مقطع ۲۰۰، ارتفاع ۱۵۰ و طول ۲۳۰۰ میلی‌متر می‌باشند (شکل ۱). از این چهارنمونه، سه نمونه با ورق‌های FRP با تعداد لایه‌های مختلف تقویت شده‌اند و یک نمونهٔ دیگر به عنوان نمونه مبنای تقویت نشده مورد آزمایش قرار گرفته است. شکل (۱) ابعاد هندسی و آرایش میل‌گردهای طولی و عرضی هریک از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، جزییات نمونه‌های آزمایشگاهی وحالت شکست هر یک از تیرها در جدول (۱) ارایه شده است. برای جزییات ویژگی‌های مکانیکی بتن، میل‌گردها و ورق‌های FRP به مرجع [4] مراجعه شود. نمونه‌های آزمایشگاهی مجموعه دوم تیرهایی به عرض مقطع ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۲۰۰۰ میلی‌متر می‌باشند. شش نمونه با ورق‌هایCFRP به ضخامت ۰/۱۷٦ میلی‌متر و با عرض و تعداد لایه های مختلف تقویت شده‌اند و دو نمونهٔ دیگر به عنوان نمونه‌های مبنای تقویت نشده مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مقاومت کششی نهایی ورق‌های CFRP ۳۸۰۰ MPa بوده است. برای پیش‌گیری از جدا شدن انتهای ورق‌های FRP از سطح تیر در تعدادی از نمونه‌های تقویت شده، ورق‌های CFRP از روی تکیه گاه عبور داده شده‌اند تا زمینه برای بررسی حالت‌های دیگر شکست (غیر از جدا شدن انتهای ورق‌های FRP) فراهم آید (شکل۲). ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی هر یک از نمونه ها در شکل (۲) آورده شده است. همچنین، جزییات نمونه‌های آزمایشگاهی و حالت شکست هر یک از آنها در جدول (۲) ارایه شده است.

شبیه‌سازی رفتار مصالح

بتن. از الگوی آسیب دیدگی مومسان بتن برای شبیه‌سازی رفتار آن استفاده می‌شود. در این الگو فرض می‌شود که خردشدگی فشاری بتن و ترک خوردگی آن ساز و کارهای اصلی شکست بتن می‌باشند [5]. هردوی این پدیده‌ها ناشی از شروع و گسترش ترک‌ها می‌باشند. عامل‌های اصلی مورد نیاز برای استفاده از این الگو عبارتند از:

الف- منحنی نرم شوندگی بتن در بارگذاری کششی تک محوری که در شکل (۳) نمایش داده شده است. در منحنی‌های شکل (۳)، f'_t مقاومت کششی بتن است که شروع ترک‌های ریز در بتن را مشخص می‌کند، G_F کل کارمایه شکست است که بنابر تعریف میزان کارمایه لازم برای شروع، گسترش و شکست کامل یک ترک در واحد سطح می‌باشد و w مقدار بازشدگی عرض ترک است. برای مقایسه نتیجه‌ها، از سه نوع منحنی نرم شوندگی بتن در بار کششی برای تحلیل‌ها استفاده می‌شود. نظریه مکانیک شکست G_F با رابطه زیر داده می‌شود.

$$G_F = \int_0^{w_c} \sigma(w)\, dw \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، σ تنش کششی بتن تابع باز شدگی عرض ترک w می‌باشد. w_c عرض ترک بحرانی بوده که با ازای آن تنش σ صفر است.

منحنی نرم شدگی بتن را می‌توان به صورت تجربی به دست آورد. به عنوان مثال، مقاومت کششی (f'_t) را می‌توان از نتیجه‌های آزمایش شکاف خوردگی استوانه (Split Cylinder Test) تعیین کرد [6] و کارمایه شکست (G_F) را می‌توان با استفاده از رفتار بار - تغییر شکل تیرهای بتنی شکاف‌دار محاسبه کرد [7]. در صورتی که این عامل‌های تجربی در دسترس نباشند، می‌توان از رابطه‌های (۲) و (۳) برای محاسبهٔ آن‌ها بهره گرفت [8-10].

$$f'_t = 0.6\sqrt{f'_c} \qquad (۲)$$

$$G_F = 2.5\, a_0 \left(\frac{f'_c}{0.051}\right)^{0.46} \left(1+\frac{d_a}{11.27}\right)^{0.22} \left(\frac{w}{c}\right)^{-0.3} \qquad (۳)$$

در رابطه‌های (۲) و (۳) مقاومت کششی بتن

$f_t'(MPa)$، مقاومت فشاری بتن $f_c'(MPa)$، کارمایه شکست بتن $G_F(j/m^2)$، برای سنگدانه‌های گوشه‌دار و شکسته $\alpha_\circ = 1.44$، بیشترین اندازه سنگدانه $d_a(mm)$ و نسبت آب به سیمان در اختلاط بتن w/c است. هنگامی‌که عامل‌های f_t' و G_F معلوم شوند، بنا به شکل (۳)، می‌توان منحنی نرم شوندگی را با کمک تابع‌های خطی و یا دو خطی تخمین زد [7].

ب- منحنی تنش- کرنش بتن در بارگذاری فشاری تک محوری در شکل (٤) نشان داده شده است. در شکل (٤)، Ec ضریب کشسانی بتن، f_{co} تنش بحرانی است که شروع ترک‌ها را مشخص می‌کند و f_c' مقاومت فشاری بتن می‌باشد. در تحلیل‌های عددی این پژوهش از منحنی تنش- کرنش، نوع ب و ج شکل (٤) [8,9] برای مقایسه استفاده شده است.

اگر داده‌های تجربی از ضریب کشسانی بتن (Ec) و رفتار فشاری بتن در دست نباشد، می‌توان رابطه‌های (٤) و (٥) را به کار برد [8].

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \quad (MPa) \tag{٤}$$

$$\varepsilon_0 = 1.71\frac{f_c'}{E_c} \tag{٥}$$

فولاد. از الگوی کشسان- مومسان کامل برای شبیه‌سازی رفتار فولاد استفاده می‌شود [11]. در این روش رفتار فولاد تا رسیدن به تنش تسلیم کشسان می‌باشد. در این نقطه فولاد در اثر بار ثابت جاری می‌شود (شکل٥). عامل‌های مورد نیاز این الگو، ضریب کشسانی فولاد (E_s)، نسبت پواسون (ν) و تنش تسلیم (f_y) می‌باشند.

ورق‌های FRP. از الگو شکست ترد برای شبیه سازی رفتار ورق‌هایFRP به کار می‌رود [11]. در این روش رفتار ورق‌های FRP تا رسیدن به کرنش نهایی (ε_u) خطی فرض می‌شود (شکل٦). در این نقطه، ترک گسترش می‌یابد و ماده همه ظرفیت باربری خود را به یکباره از دست می‌دهد. عامل‌های مورد نیاز برای این الگو، ضریب کشسان پلیمرهای الیافی (E_{frp})، نسبت پواسون (ν) و کرنش نهایی شکست (ε_u) می‌باشند.

تحلیل عددی

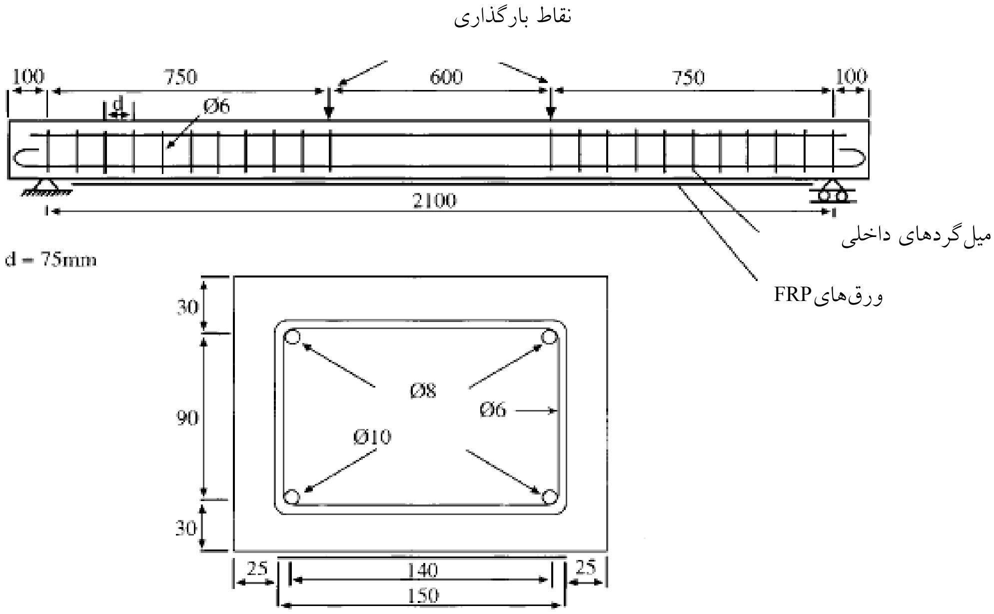
در این مطالعه تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS [11] انجام شده است. به دلیل تقارن، تنها نیمی از طول تیرها، شبیه‌سازی شده‌اند. نوع اجزای انتخابی برای شبیه‌سازی تیرها در جدول (۳) ارایه شده است.

در این شبیه‌سازی از تماس مقید(Tied Contact) برای چسباندن ورق‌های FRP به سطح تیر استفاده شده است. این نوع تماس، چسباندن دو سطح با شبکه بندی متفاوت را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین تعریف این نوع تماس بین دو سطح باعث می‌شود که در هر یک از نقاط روی سطح با شبکه بندی ریزتر، جابه جایی، دما و فشار برابر با نزدیک‌ترین نقطه بر روی سطح با شبکه‌بندی درشت‌تر باشد. این روش امکان الگوسازی تنش‌های برشی و قائم در طول کل صفحات چسبیده را فراهم می‌سازد.

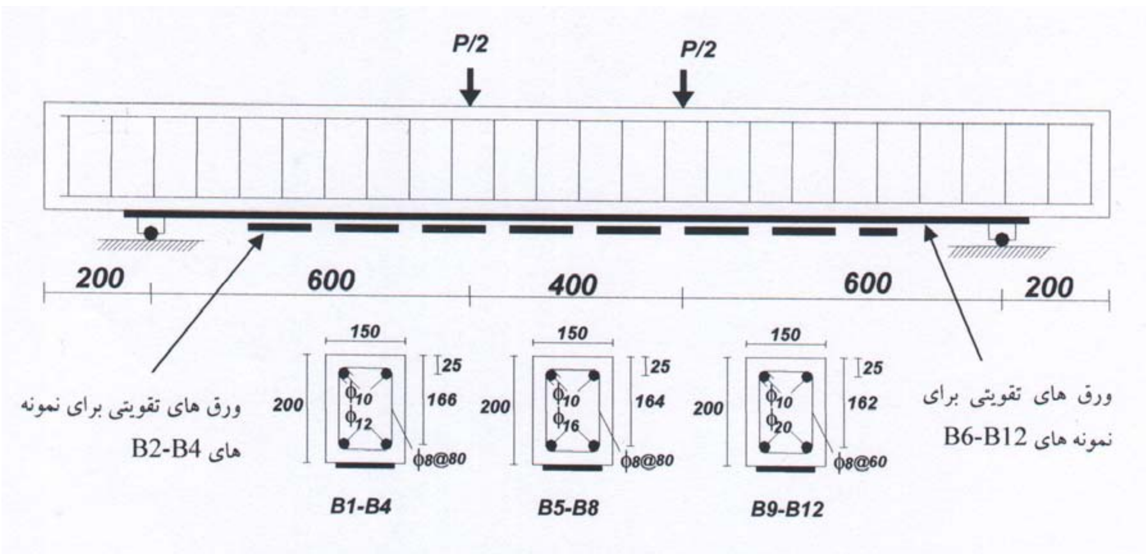
مقایسه نتیجه‌های عددی و نتیجه‌های آزمایشگاهی

نمودارهای بار- تغییر مکان وسط دهانه برای چهار تیر مجموعه اول و هشت تیر مجموعه دوم به همراه نتیجه‌های تجربی آن‌ها در شکل‌های(۷) و (۸) ارایه شده است.

نتیجه‌های تحلیل عددی در شکل‌های (۷) و (۸) براساس منحنی تنش- کرنش فشاری بتن، نوع ج (شکل ٤) هستند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هماهنگی بسیار خوبی بین نتیجه‌های آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. نتیجه‌های عددی نیز مانند آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مقاومت تیر پس از جدا شدن انتهای ورق‌های FRP از سطح تیر و یا پارگی ورق‌های FRP به اندازه مقاومت تیر بدون تقویت کاهش می‌یابد (شکل ۸).



شکل ۱ ابعاد هندسی و آرایش میل‌گردهای طولی و عرضی نمونه‌های مجموعه اول



شکل ۲ ابعاد هندسی و آرایش میل‌گردهای طولی و عرضی نمونه‌های مجموعه دوم

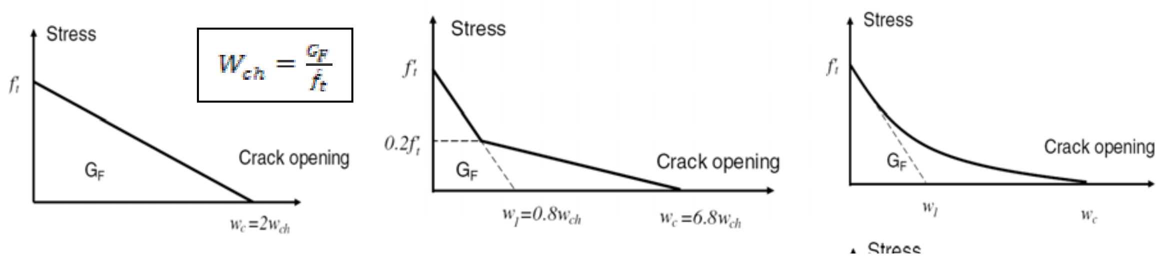
جدول ۱ جزییات نمونه‌های آزمایشگاهی مجموعه اول [4]

نوع شکست	نوع و سطح مقطع ورق‌های FRP (mm^2)	f'_c	نمونه‌ها
خرد شدگی فشاری بتن بعد از تسلیم میل‌گردها	۰	61	B1
جدا شدن انتهای ورق‌های FRP	٦۰- کربن	61	B3
جدا شدن انتهای ورق‌های FRP	۱۸۰- کربن	61	B5
جدا شدن انتهای ورق‌های FRP	۲۷۰- شیشه	61	B7

جدول ۲ جزییات نمونه‌های آزمایشگاهی نمونه‌های مجموعه دوم

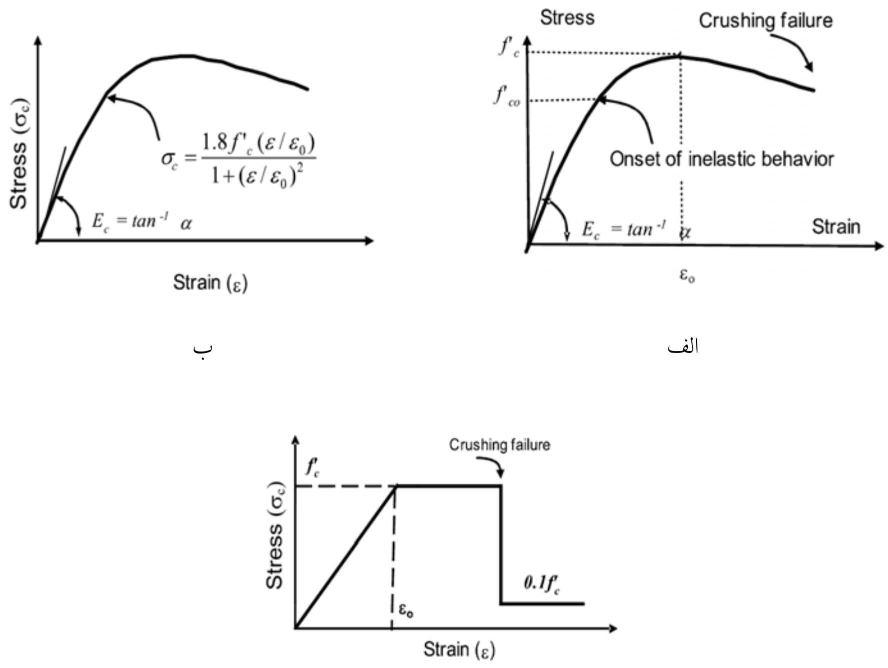
حالت شکست*	فاصلهٔ انتهای ورق‌های FRP از تکیه‌گاه (mm)	تعداد لایه‌های ورق‌های FRP	عرض هر لایه از ورق‌های FRP (mm)	f'_c (MPa)	نمونه‌ها
۲	۰	۰	۰	۲۵/۲	B1-12D-0L
۱	۱۰۰	۱	۱۵۰	۲۵/۲	B2-12D-1L15
۳	۱۰۰	۲	۱۵۰	۲۵/۲	B3-12D-2L15
۳	۱۰۰	۳	۱۵۰	۲۵/۲	B4-12D-3L15
۲	۰	۰	۰	۲٤/۱	B9-20D-0L
۱	۰	۱	۱۰۰	۲٤/۱	B10-20D-1L10
۵	۰	۱	۱۵۰	۲٤/۱	B11-20D-1L15
۵	۰	۲	۱۵۰	۲٤/۱	B12-20D-2L15

*حالت۱: تسلیم فولادهای طولی و گسیختگی ورق FRP به همراه خردشدن بتن ناحیهٔ فشاری؛ حالت۲: جاری‌شدن فولادهای طولی و خردشدن بتن ناحیهٔ فشاری بعد از تسلیم میل‌گردهای طولی؛ حالت۳: جداشدن انتهای ورق‌های FRP از سطح بتن به همراه پوشش بتن روی میل‌گردهای طولی؛ حالت۵: جداشدن ورق‌های FRP از سطح بتن به همراه بخشی از پوشش بتن به علت ترک خمشی ویا خمشی-برشی و خرد شدگی فشاری بتن.



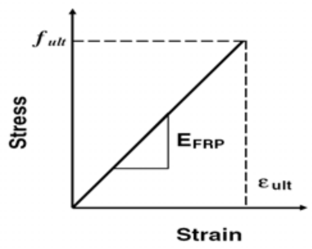
ج ب الف

شکل ۳ منحنی نرم شوندگی بتن: (الف) حالت کلی (ب) تقریب دو خطی (ج) تقریب خطی [7, 8]

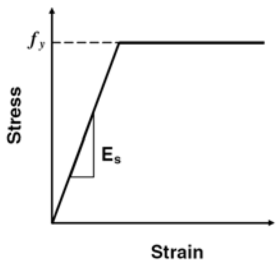


ج

شکل ٤ منحنی تنش_کرنش بتن در فشار تک محوری: (الف) حالت کلی، (ب) الگوی A [8]، (ج) الگوی B [9]



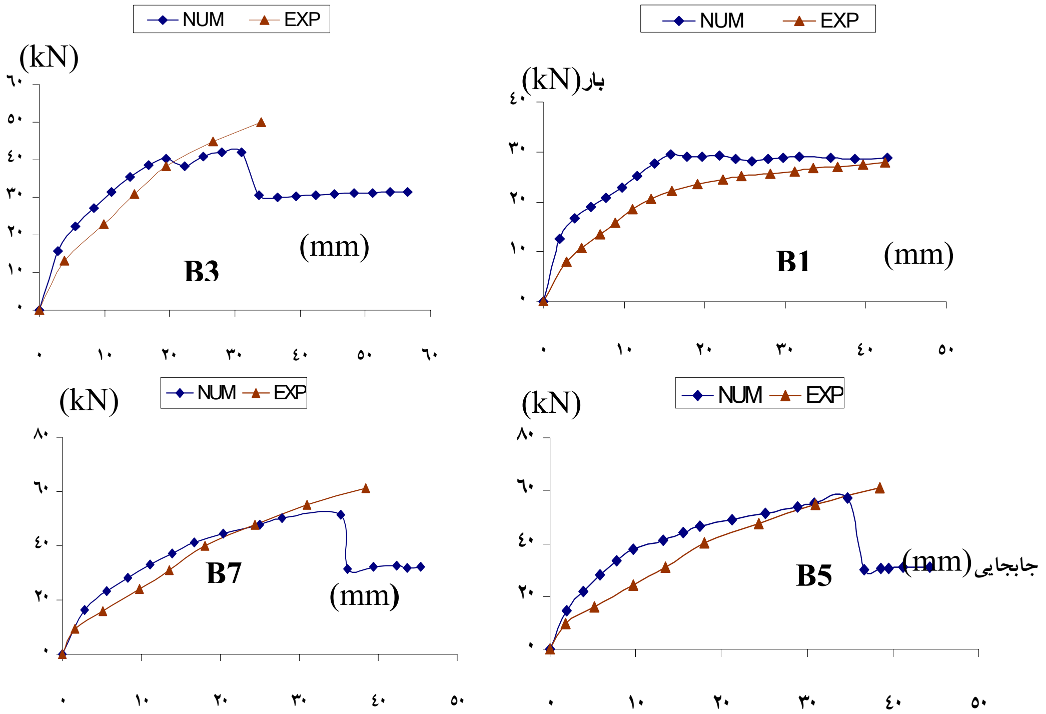
شکل ٥ منحنی تنش- کرنش فولاد



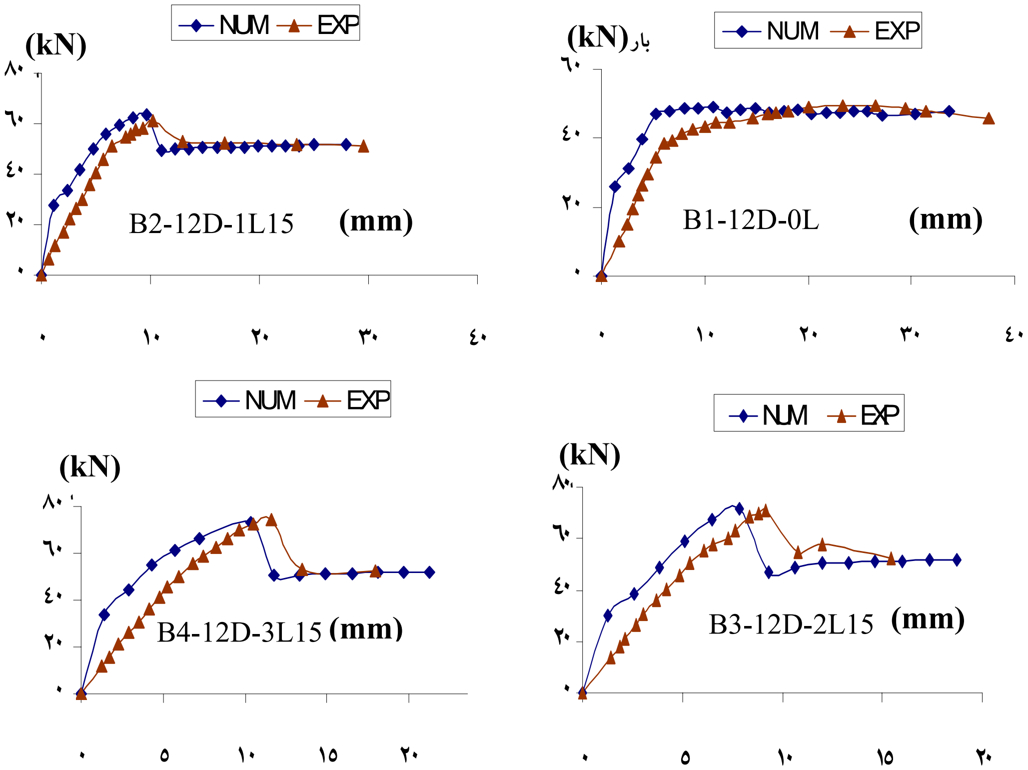
شکل ٦ منحنی تنش-کرنش ورق‌های FRP

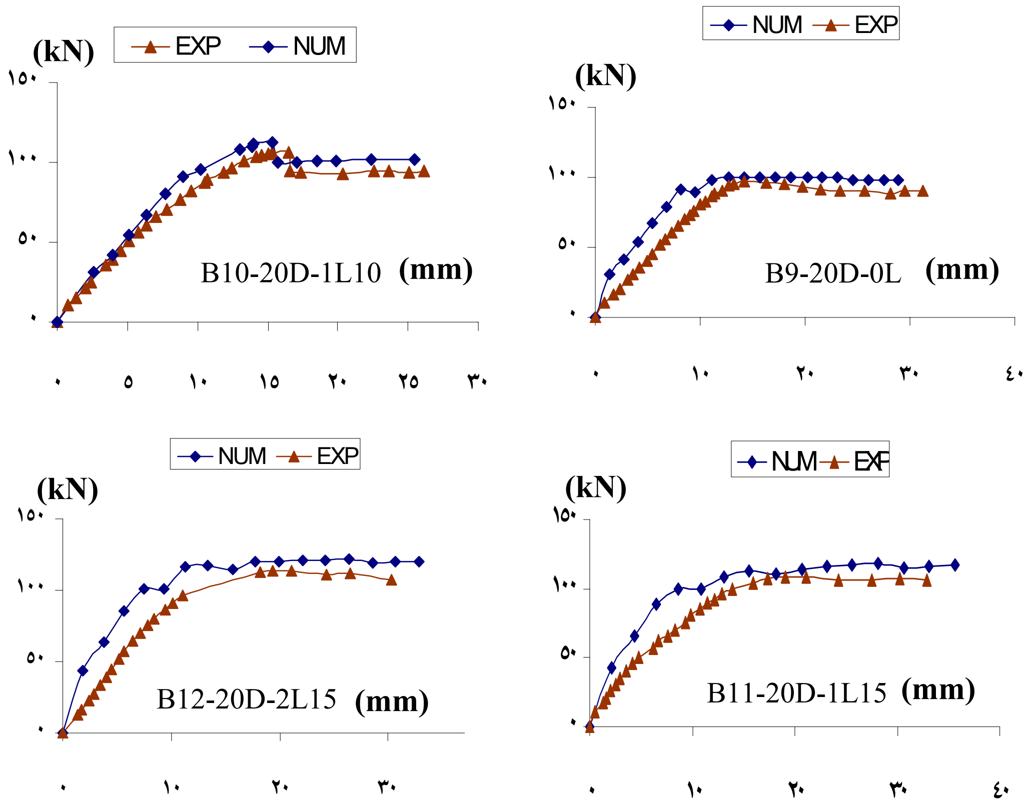
جدول ۳ نوع اجزای انتخابی برای تحلیل عددی

توضیحات	نشانه نرم افزاری	جزء انتخابی	ماده
–	CPE4R	جزء کرنش صفحه ای چهار گرهی	بتن
جزء جاسازی شده	T2D2	جزء خرپایی دو گرهی	فولاد
–	T2D2	جزء خرپایی دو گرهی	ورق‌های *FRP*

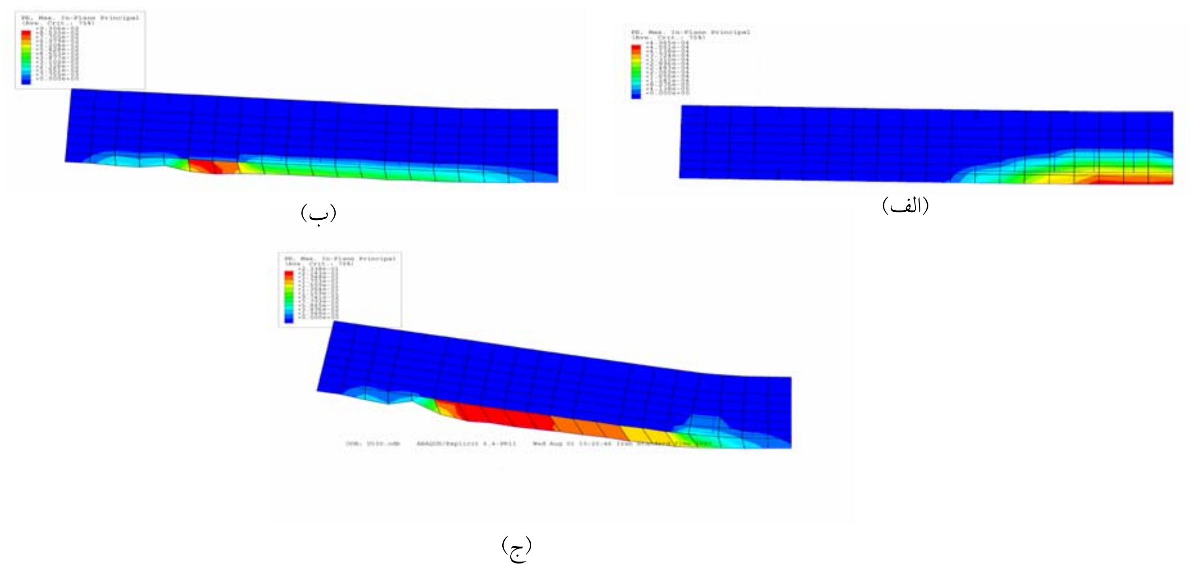


شکل ۷ نمودارهای بار- جابه جایی وسط دهانه برای تیرهای مجموعه اول





شکل ۸ نمودارهای بار- جابه جایی وسط دهانه برای تیرهای مجموعه دوم



شکل ۹ پیش بینی توزیع آسیب دیدگی در تیر B3-12D-2L15، (الف) پیش از بار بیشینه، (ب) در بار بیشینه
(ج) پس از بار بیشینه و در انتهای تحلیل

تحلیل حساسیت

در الگوسازی عددی تیرهای تقویت شده با ورق‌هایFRP رفتار غیر خطی مواد، می‌تواند روی نتیجه‌ها بسیار اثر بگذارد. از سوی دیگر، در رفتار غیرخطی مواد، عامل‌های گوناگونی دخالت دارند. به این دلیل از نقطه نظر عملی، انجام یک تحلیل حساسیت برای پیدا کردن عامل‌های اصلی اثرگذار در پاسخ‌های تحلیل عددی ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، با مشخص شدن این عامل‌ها می‌توان روش‌های عددی موجود را نیز با خطای کمتری ساده سازی کرد. در این بخش حساسیت روش عددی، نسبت به ویژگی‌های بتن مانند مقاومت کششی (f'_t)، کارمایه شکست (G_F)، منحنی نرم شوندگی کرنش، منحنی تنش- کرنش فشاری و همچنین اندازه شبکه‌بندی و الگوسازی چسب بررسی می‌شود. این تحلیل حساسیت بر روی تیرهای B3-12D-2L15 و B11-20D-1L15 انجام شده است. همان‌گونه که پیش‌تر نیز بحث شد، تیر B3-12D-2L15 به دلیل جدا شدن انتهای ورق‌هایFRP از سطح تیر به همراه پوشش بتن دچار شکست شده و در تیرB11-20D-1L15 ابتدا ورق‌های FRP به علت ترک‌های خمشی از سطح بتن در طول کل تیر جدا شده است. ولی به دلیل عبور ورق‌های FRP از زیر تکیه‌گاه‌ها، جدا شدن ورق‌های FRP به شکست تیر نمی‌انجامد و مقاومت تیر افزایش می‌یابد و در انتها خردشدگی فشاری بتن، باعث شکست تیر می‌شود.

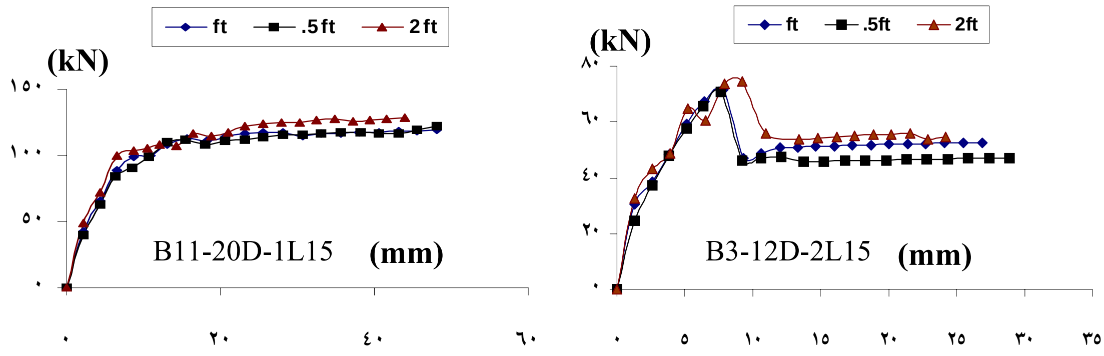
حساسیت به مقاومت کششی (f'_t). برای بررسی حساسیت تحلیل عددی به مقاومت کششی بتن (f'_t)، تحلیل عددی با سه مقدار مختلف مقاومت کششی $0.5f'_t$، f'_t و $2f'_t$ انجام شده است. شایان توجه است که برخی از پژوهشگران، مقاومت کششی بتن را به عنوان مقدار محدود کنندهٔ تنش‌های به وجود آمده در سطح مشترک چسب و بتن معرفی می کنند [9]. نتیجه‌های عددی ناشی از تغییر این عامل به تنهایی، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تغییر این عامل در مقدار بار بیشینه و حالت شکست تیرها تغییر چندانی ایجاد نکرده است. با افزایش مقاومت کششی، سختی تیر کمی افزایش می‌یابد که از نظر کاربردی قابل چشم پوشی است. نتیجه مهمی که از این تحلیل گرفته می‌شود، آن است که مقاومت کششی بتن نمی‌تواند به تنهایی به عنوان معیار شکست برای پیش‌بینی شکست استفاده شود.

حساسیت به کارمایه شکست (G_F). برای بررسی حساسیت تحلیل عددی به کارمایه شکست بتن (G_F)، تحلیل عددی با سه مقدار مختلف، $0.5G_F$, G_Fو $2G_F$ انجام شده است. نتیجه‌های تحلیل عددی در شکل (۱۱) نمایش داده شده‌اند. نکته قابل توجه در این تحلیل آن است که در تیر B3-12D-2L15 که شکست آن به دلیل جدا شدن انتهای ورق‌های FRP می‌باشد، تغییر عامل G_F در پاسخ‌ها اثر چشم‌گیری دارد و دلیل آن را می‌توان شکست ناشی از رشد و گسترش ترک‌ها در منطقه کششی بتن دانست. ولی در تیر B11-20D-1L15 که به دلیل خرد شدگی فشاری بتن دچار شکست شده است، تغییر این عامل، اثر چندانی در پاسخ‌ها ندارد. نتیجه مهم این تحلیل آن است که کارمایه شکست، نقش مهمی در شکست ناشی از جدا شدن انتهای ورق‌های FRP دارد. از آنجا که بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، شکست ناشی از جدا شدن انتهای ورق‌های FRP از سطح تیر، نتیجه رشد و گسترش ترک در راستای سطح مشترک چسب و بتن می‌باشد، به نظر می‌رسد که کارمایه سطح مشترک چسب و بتن می‌تواند عامل اثرگذارتری از کارمایه شکست بتن در پیش بینی این گونه شکست باشد [9].

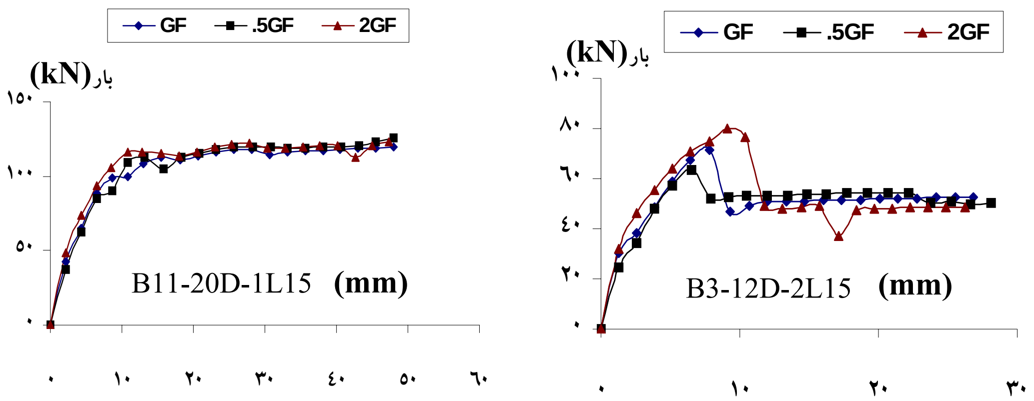
حساسیت به منحنی نرم شوندگی کرنش. در این بخش حساسیت نتیجه‌های عددی به انتخاب منحنی نرم شوندگی بررسی می شود. برای این منظور در شبیه سازی از دو منحنی نرم شوندگی خطی و دو خطی شکل‌های (۳ب) و (۳ج) استفاده شده است. نتیجه‌های عددی به دست آمده در شکل (۱۲) نمایش داده شده‌اند. نتیجه‌ها نشان می‌دهند

که نوع منحنی نرم شوندگی اثر ناچیزی در بارهای بیشینه و جابه جاییها دارد. به سخن دیگر از نظر کاربردی تأثیر نوع منحنی نرم شوندگی قابل چشم‌پوشی است.

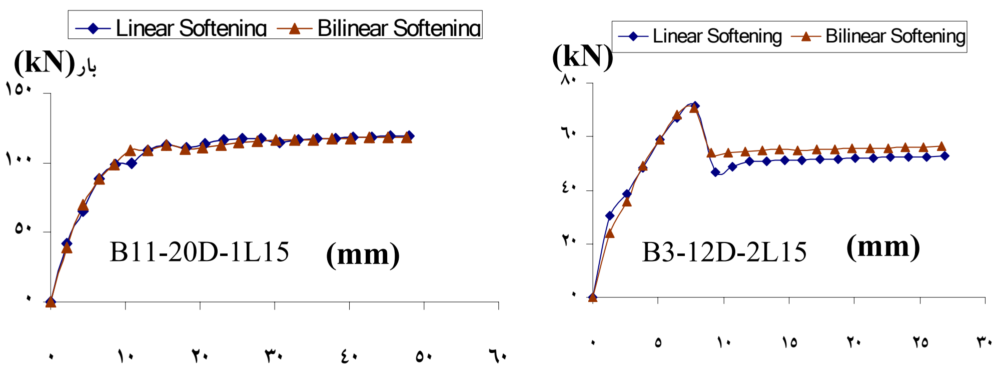
با وجـود ایـن، بـا مقایسه نتیجه‌هـای تحلیـل بـا نتیجه‌های آزمایشگاهی به نظـر مـی‌رسـد کـه الگـوی دو خطی پاسخ‌های بهتری در اختیار می‌گذارد.



شکل ۱۰ حساسیت به مقاومت کششی (f'_t)

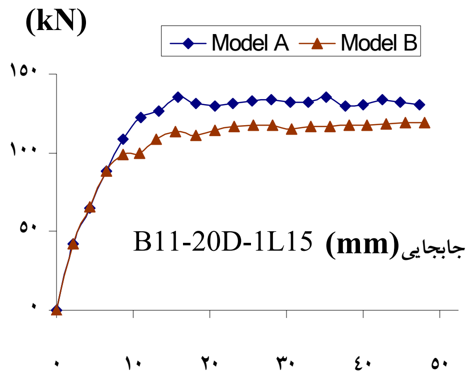


شکل ۱۱ حساسیت به کارمایه شکست (G_F)



شکل ۱۲ حساسیت به منحنی نرم شوندگی کرنش

حساسیت به منحنی رفتار فشاری بتن. برای بررسی حساسیت تحلیل عددی به نوع منحنی فشاری بتن از دو منحنی نشان داده شده در شکل‌های(٤ب) و (٤ج) در شبیه سازی عددی استفاده شده است. بنا به نتیجه‌های نشان داده شده در شکل (۱۳) تا حدودی هماهنگی خوبی بین نتیجه‌های عددی برای هر دو منحنی وجود دارد. شکل (٤ب) الگوی پیشنهادی Mac Gregor [8] می‌باشد که با Model A مشخص شده است و شکل (٤ج) الگوی پیشنهادی Coronado [9] می‌باشد که با Model B مشخص شده است.

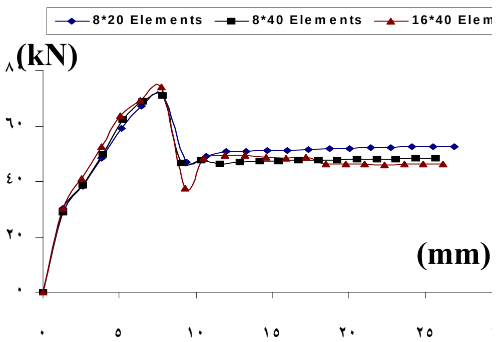


شکل ۱۳ حساسیت به منحنی فشاری بتن

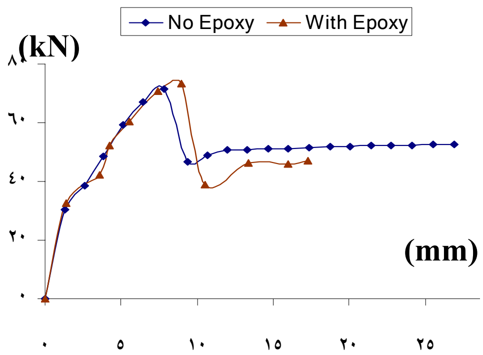
انتخاب اندازه شبکه‌بندی. برای بررسی حساسیت تحلیل عددی انجام شده به اندازه شبکه‌بندی سه گونه شبکه‌بندی مختلف برای تحلیل تیر نمونه B3-12D-2L15 مورداستفاده قرار گرفته است. منحنی‌های بار- جابه‌جایی به دست آمده از تحلیل با این شبکه‌بندی‌ها در شکل (١٤) ارایه شده است. پاسخ‌های هرسه تحلیل با تقریب، یکسان هستند. به همین علت می‌توان نتیجه گرفت که روش عددی مورد استفاده در این مطالعه به اندازه شبکه‌بندی وابسته نیست.

الگوسازی چسب. در این بخش اثر الگوسازی چسب بررسی می‌شود. بدین منظور ورق‌های FRP و چسب با اجزای کرنش صفحه‌ای (CPE4R) الگوسازی می‌شوند. پیوند اجزای چسب به بتن با تماس مقید انجام می‌شود.

نتیجه‌های عددی به دست آمده در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. برای مقایسه، الگوی دومی بدون در نظرگرفتن چسب نیز تحلیل شده است. در این تحلیل، ورق‌های FRP با کمک اجزای خرپایی الگوسازی شده‌اند و مستقیم با تماس مقید به سطح بتن چسبانده می‌شوند. در این روش انتقال بار، تنها در نقاط تماس انجام می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هر دو روش می‌توانند رفتار کلی تیر B3-12D-2L15 را با اختلافی بسیار کم در بار بیشینه و جابه جایی آن پیش‌بینی کنند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که حتی در تیری که شکست آن ناشی از جدا شدن انتهای پلیمرهای الیافی از سطح تیر است، الگوسازی چسب اثر بسیار کمی در پاسخ تیر دارد و با توجه به اینکه استفاده از اجزای کرنش صفحه‌ای زمان محاسبات را بسیار بالا می‌برد، از نظر کاربردی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش دوم مناسب‌تر است.



شکل ١٤ حساسیت به اندازه شبکه‌بندی تیر B3-12D-2L15



شکل ۱۵ حساسیت به الگوسازی چسب B3-12D-2L15

نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار تیرهای خمشی بتن مسلح تقویت شده با ورق‌های FRP با انجام آزمایش و استفاده از تحلیل‌های عددی و حساسیت، مورد بررسی قرار گرفت. براساس مقایسه بین مقدارهای به دست آمده از تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی نتیجه‌های زیر به دست آمد:

۱. تحلیل عددی انجام شده با استفاده از الگوی آسیب‌دیدگی مومسان بتن که در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS در دسترس است، نه تنها می‌تواند منحنی بار- جابه جایی، بار شکست و حالت شکست تیرهای تقویت شده با ورق‌های FRP را پیش‌بینی می‌کند، بلکه از توانایی پیش بینی گسترش آسیب دیدگی واقعی نیز برخوردار است.

۲. تحلیل عددی نیز مانند نتیجه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پس از جدا شدن انتهای ورق هایFRP و یا گسیختگی آن‌ها مقاومت تیر تقویت شده برابر با مقاومت تیر تقویت نشده می‌شود.

۳. تحلیل حساسیت انجام شده در مورد عامل‌های اثرگذار بر رفتار تیرهای خمشی تقویت شده نشان داد که از دسته عامل‌های مختلف وابسته به ویژگی‌های مکانیکی بتن شامل مقاومت کششی، کارمایه شکست، منحنی نرم شوندگی کرنش و منحنی رفتار فشاری بتن، کارمایه شکست بتن G_F اثرگذارترین عامل در پیش بینی شکست‌های ناشی از جداشدگی ورق‌های FRP از سطح تیر به دلیل ترک خوردگی کششی بتن می‌باشد.

٤. تحلیل‌های عددی انجام شده به انتخاب اندازه شبکه‌بندی وابسته نیستند.

مراجع

1. ACI 440.2R-02,"Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", Reported by ACI Committee 440, (2002).
2. Ziraba, Y.N., Baluch M.H., "Computational model for reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates", Finite Element Analysis Des, 20, (4), pp. 253-271, (1995).
3. Arduini, M., Tommaso A. "Brittle failure in FRP plate and sheet bonded beams", *ACI Structural Journal*, 94, (4), pp. 363-370, (1997).
4. Rahimi, H., Hutchinson A., "Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates", *Journal of Composite Construction,* 5, (1), pp. 44-56, (2001).
5. Lubliner, J., Oliver J., Oller S., Onate E., "Plastic-damage model for concrete", *International Journal of Solids and Structures,* 25, (3), pp. 299-326, (1989).
6. Rocco, C., Guinea G.V., Planas J., Elices M.,"Review of splitting-test standards from a fracture mechanics point of view", Cement Concrete Research, 31, (1), pp. 37-82, (2001).
7. Shah, S.P., Swarts S.E., Ouyang C., "*Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials* ", John Wiley & Sons Inc, (1995).
8. MacGregor, J.G., "*Reinforced Concrete: mechanics and design* ", Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, (1997).

9. Coronado, C., Lopez M.M., "Sensitivity analysis of concrete beams strengthened with FRP laminates", Cement &Concrete Composites, Elsevier Science Publishers, 28, pp.102-114, (2006).
10. Bazant, Z.P, Becq-Giraudon E., “Statistical predication of fracture parameters of concrete and implication for choice of testing standard”, Cement Concrete Research, 32, (4), pp. 529-556, (2002).
11. ABAQUS Users Manual, Version 6.5. Hibbitt, Karlson & Soreneesen, Inc. Pawtucket, RI. (2004).